

УДК 662.61

Б. И. Бахтин, М. Д. Диев, С. И. Каськов,
А. П. Кубышкин, Г. И. Павлов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА И ДЛИНЫ РЕЗОНАНСНОЙ ТРУБЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРЫ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния основных характеристик камеры пульсирующего горения на спектральные характеристики камеры, область устойчивой работы в режиме пульсаций, условия зажигания камеры при использовании газообразного топлива с определением шумовых характеристик установки.

E-mail: kaskov@power.bmstu.ru

Ключевые слова: пульсирующее горение, устойчивость, акустика, частотные характеристики, экспериментальные исследования.

Пульсирующее горение используется для повышения эффективности сжигания товарных топлив, например, угольной пыли. В последние годы метод пульсирующего горения все шире используется при сжигании различных отходов производств. В настоящее время получены положительные результаты в термическом обезвреживании отходов химического производства, горюче-смазочных материалов, трансформаторных масел, низкосортного мазута, донных осадков мазутных емкостей, нефтешлаков и т.д. Опыт эксплуатации установок пульсирующего горения показывает, что при разработке устройств с большой мощностью возникают трудности принципиального характера: простое масштабное увеличение не сопровождается существованием пульсационного режима в прежней оптимальной форме, а зачастую вообще не позволяет достичь его. С увеличением тепловой мощности возрастает также звуковое излучение, являющееся основным недостатком камер пульсирующего горения. Акустическое воздействие при увеличении габаритных размеров обостряет конструкционные проблемы. Следовательно, рост мощности может привести к значительному перевесу недостатков пульсирующего горения в сравнении с его преимуществами. Поиск эффективных путей устранения указанных недостатков с сохранением основных преимуществ пульсационного горения является весьма актуальной задачей.

Цель настоящей работы состоит в рассмотрении возможности регулирования процесса пульсирующего горения за счет изменения па-

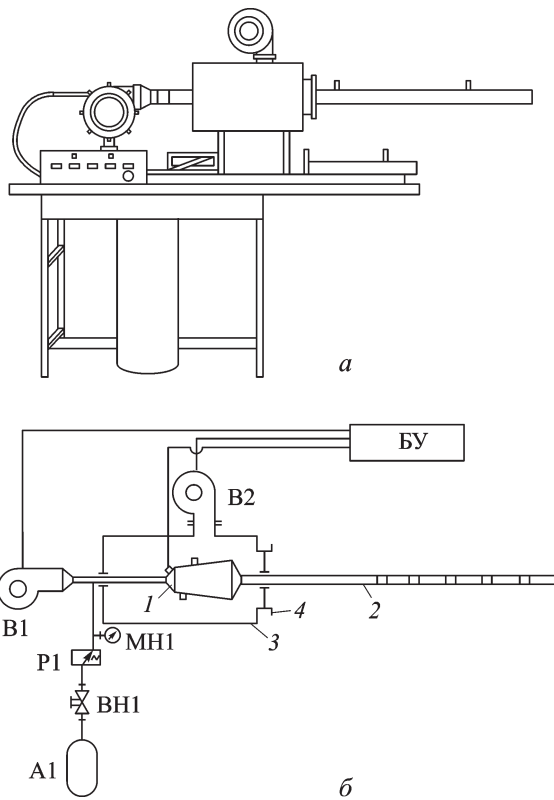


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б) экспериментальной установки

раметров, оказывающих заметное влияние на режимы горения, — коэффициента избытка воздуха, длины резонансной трубы.

Эксперименты проводились на установке [1], общий вид и схема которой показаны на рис. 1. Объектом исследований явилась камера пульсирующего горения (КПГ), работающая по принципу трубы Шмидта. Камера изготовлена по рекомендациям, изложенным в работах [2–4], с небольшими доработками. Камера состоит из двух основных частей: собственно камеры горения 1 в форме усеченного конуса с максимальным диаметром 100 мм и объемом 3 л, резонансной трубы 2 диаметром 50 мм и длиной 1000, 1200, 1400, 1600 и 1800 мм. Используемое топливо — газ пропан C_3H_8 и воздух. Горючий газ из баллона A1 в камеру 1 подавался по направлению потока через трубку диаметром 5 мм, вставленную соосно в аэродинамический клапан камеры. Давление газа в трубке регулировалось редуктором P1. Расход газа через трубку определялся согласно методике [1]. Стенки КПГ во время работы охлаждались воздухом, нагнетаемым вентилятором, причем расход охлаждающего воздуха оставался постоянным во всех опытах. Воздух в короб 3 нагнетался вентилятором B2. Резонансная труба составлена из патрубков, изготовленных из коррозионно-стойкой стали. Трубы между собой состыкованы соединительными кольцами. К

воздушному коробу резонансная труба прикреплена при помощи центрирующего устройства 4. Резонансная труба охлаждалась воздухом,двигающимся по кольцевому зазору, образованному резонансной трубой и кожухом. Вентилятор В1 и воздушный короб 3 установлены на стойках, которые приварены к основанию. Газовоздушная смесь поджигалась искровой автомобильной свечой, которая запитывалась от индукционной катушки, располагаемой в блоке управления БУ. После воспламенения смеси зажигание выключалось и дальнейшее горение происходило без постороннего запала. Изменением (путем изменения частоты вращения вентилятора В1) расхода воздуха, нагнетаемого в камеру или расхода горючего газа, устанавливался исследуемый режим работы камеры. Пульсации давления в камере определялись акустическим зондом, вводимым в камеру через резонансную трубу. Для определения температуры и состава продуктов сгорания внутрь резонансной трубы в разных ее сечениях устанавливались термоэлектрические термометры типа ИС-470 и газоотборники.

Одной из основных характеристик пульсирующего горения является амплитуда колебаний давления в камере. Зависимость ее от различных режимных параметров процесса необходима при создании методики расчета камер пульсирующего горения. Опыты проводились при различных расходах горючего от 0,8 до 3 кг/ч. Коэффициент избытка воздуха варьировался в широких пределах в основном за счет изменения расхода воздуха в диапазоне от 18 до 240 кг/ч. Исследовались разные концентрации топлива, при которых оно горело. Расход воздуха при данном расходе газа устанавливался так, чтобы можно было проверить работу камеры горения в оптимальном режиме. Возможность варьирования коэффициентом избытка воздуха, кроме амплитуды пульсаций давления, позволило определить пределы устойчивости горения и срыва пульсирующего горения.

Во всех опытах в камере сгорания измерялись колебания давления (акустические пульсации или пульсации давления). На рис. 2 показаны типичные осциллограммы и спектрограммы измеренных сигналов. На рис. 3 приведены графики зависимости относительной амплитуды колебаний давления p/p^x в условиях пульсаций от коэффициента избытка воздуха при горении пропана ($p/p^x = (p^x + \delta p)/p^x$, где p^x — постоянная составляющая давления, δp — переменная составляющая). Максимальные значения амплитуды пульсаций давления соответствуют коэффициентам избытка воздуха, равным 1,05... 1,15 [1].

Одной из задач исследований было изучение условий запуска камеры. Пуск камеры и выход ее на рабочий режим осуществлялся следующим образом: в холодную камеру вначале подавался воздух (30 % от теоретически необходимого для горения), затем включалась искровая

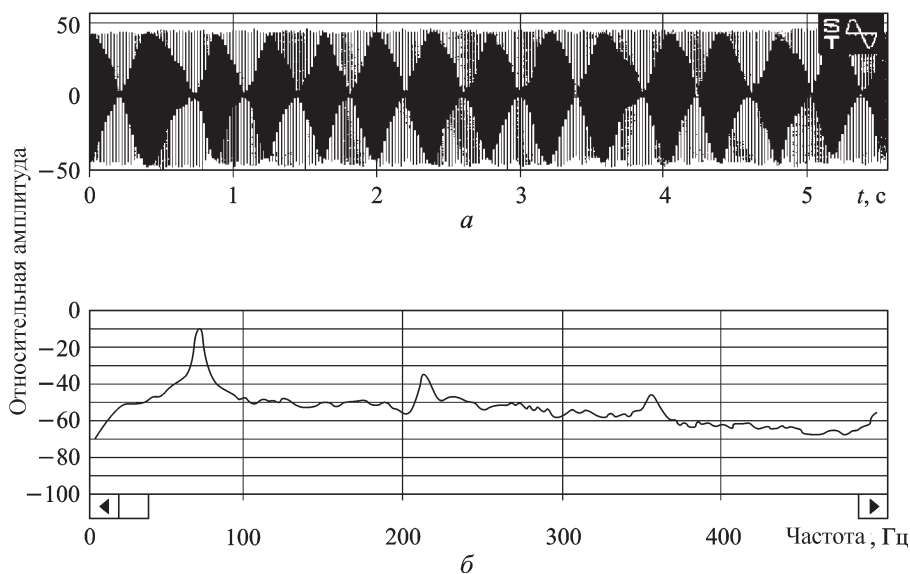


Рис. 2. Типичные сигналы пульсаций акустического давления:

a — осциллограмма; *б* — спектрограмма

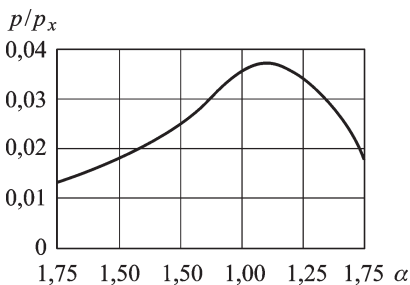


Рис. 3. График зависимости амплитуды колебания давления p/p_x от коэффициента избытка воздуха α

свеча и открывался вентиль подачи горючего газа. После воспламенения смеси прибавлялся расход воздуха и горючего до обеспечения необходимого соотношения топливной смеси при заданных производительности и режиме работы. В момент выхода камеры на рабочий режим процесс горения имел неустойчивый случайный характер. В камере сгорания пульсации давления с постоянной амплитудой устанавливались по истечении некоторого времени.

Это время приблизительно составляло 3... 4 с.

Отрабатывался и другой способ запуска камеры, отличающийся от первого характерным хлопком. Для этого в камеру одновременно подавались горючий газ и воздух в оптимальных для хлопка соотношении и количестве. При таком способе время запуска камеры составляет десятые доли секунды. После выхода на режим работа камеры была абсолютно устойчивой. Переход камеры с режима на режим при медленном изменении расхода воздуха происходил без запаздывания. При резком изменении расхода воздуха или горючего газа другой режим устанавливался не сразу. При горении смесей с коэффициентом избытка воздуха ниже 0,8 пламя срывалось и газ горел на выходе из резонансной трубы. Минимальный коэффициент избытка воздуха, соответствующий устойчивой работе камеры в режиме пульсаций,

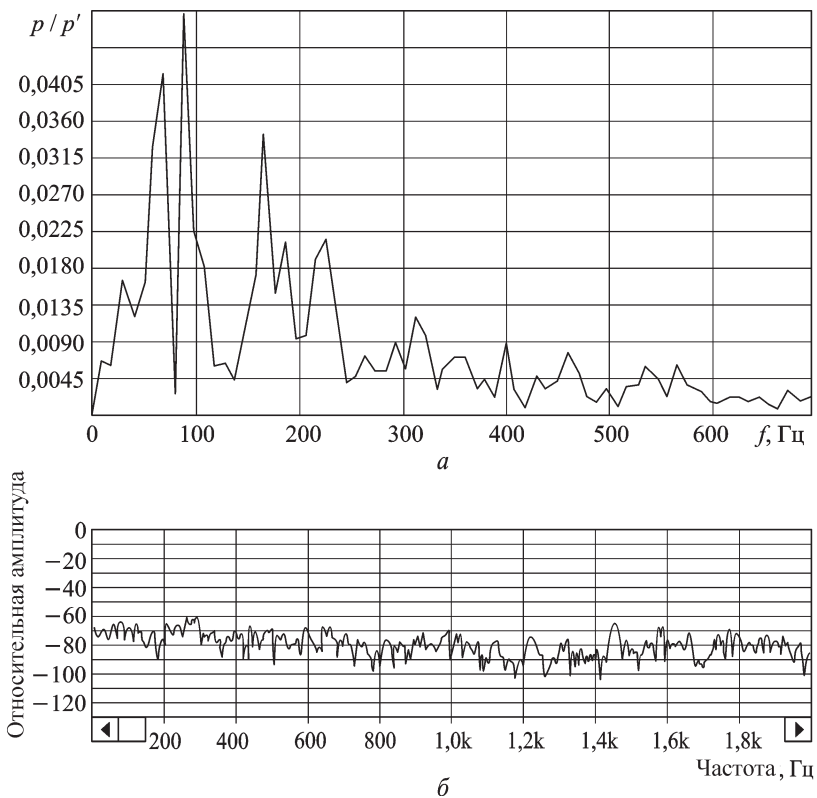


Рис. 4. Спектрограммы сигналов, записанных в камере горения при $\alpha = 0,85$ (а) и $\alpha = 2$ (б)

равнялся 0,85. При переходе в сторону богатых смесей вид спектрограммы сигнала существенно меняется, появляются субгармоники. На рис. 4, а показана одна из таких спектрограмм. Следует отметить, что снижение частоты наблюдается и при бедных смесях пропана и воздуха. Видимо, это связано со снижением температуры газов в камере пульсирующего горения. При коэффициенте избытка воздуха, близком к 2, амплитуда колебаний резко падает. Уменьшается шум работы камеры. Спектральная характеристика (рис. 4, б) свидетельствует о том, что частота не имеет явно выраженного значения. Дальнейшее увеличение количества воздуха в смеси приводит к срыву пламени. Следует отметить, что при всех исследованных избытках воздуха, при которых наблюдались устойчивые пульсации, стенки камеры горения и резонансной трубы были без следов нагарообразования, что подтверждает факт самоочистки стенок камеры от продуктов механического недожога.

Исследовалось влияние среза питающей трубки на условия запуска и процессы горения [1]. Оптимальное расстояние от среза трубки до входа в камеру составляет 2...3 диаметра воздухоподводящей трубки. В воздухоподводящей трубке амплитуда колебаний значительно ниже, чем в камере, и составляет 136 дБ. Однако при удалении среза труб-

ки от входа в камеру и приближении его к воздушному вентилятору амплитуда колебаний в воздушном тракте начинает резко возрастать. Объясняется это тем, что процесс горения захватывает и конечный (близкий к входу в камеру) участок воздухоподводящей трубки и эффективность аэродинамического клапана падает. Температура поверхности воздухоподводящей трубки начинает резко возрастать, на входе в воздушный вентилятор появляется запах горючего газа.

В диапазоне значений коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0,9 \dots 1,2$ процесс горения протекал устойчиво, частота колебаний изменялась незначительно. Температура воздуха, при которой испытывалась работоспособность камеры, изменялась в диапазоне от -15 до $+20^\circ\text{C}$. Визуальные наблюдения показали, что для камеры горения достигнутые максимальные нагрузки еще не были предельными, однако, форсирование лимитировалось характеристиками вентилятора. Теплонапряжение испытываемой камеры составляло $2,8 \cdot 10^6$ ккал/($\text{м}^3 \cdot \text{ч}$). Для разных длин труб (1000, 1200, 1400, 1600 и 1800 мм) при $\alpha = 0,9 \dots 1,2$ из спектральных характеристик камеры определялись частоты колебаний. Частоты колебаний вычислялись также расчетным путем. Расчеты проводились по известной из акустики формуле

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{MC},$$

где M — инертность резонансной трубки; C — емкость камеры.

Эти параметры определяются по формулам: $M = \frac{\rho l}{\pi R^2}$, $C = \frac{V}{\rho c_3^2}$, где ρ — плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; l — длина трубки, м; R — радиус трубки, м; V — объем камеры, м^3 ; c_3 — скорость звука, м/с.

Скорость звука рассчитывалась с учетом температуры [1] продуктов сгорания в камере и в резонансной трубке. На рис. 5 и 6 приведены зависимости числа Струхала Sh для резонансной трубки ($Sh = fd/c_3$, где d — диаметр резонансной трубки, c_3 — скорость звука в трубке) от

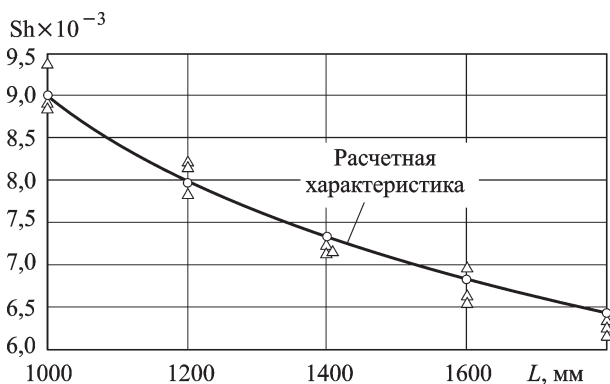


Рис. 5. Зависимость числа Струхала от длины резонансной трубки при расходе пропана C_3H_8 3 кг/ч

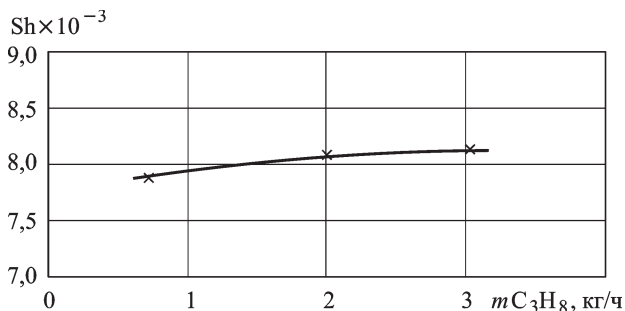


Рис. 6. Зависимость числа Струхалия от производительности камеры при длине резонансной трубы $L = 1200$ мм

длины резонансной трубы и производительности камеры. Из рис. 5 видно, что значения числа Струхалия, полученные на основе расчетных частот колебаний, с удовлетворительной точностью совпадают с экспериментальными значениями. Это позволяет сделать вывод о приемлемости приведенной формулы для ориентировочного расчета частоты колебаний камеры пульсирующего горения.

Экспериментальные исследования проведены в рамках госконтракта от 4 августа 2008 г. № 02.516.12.6010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальные и теоретические исследования процессов горения газодисперсной топливной смеси, управляемых акустическим полем, на базе разработанной математической модели // Отчет НИР № 01200901180, инв. № 02200901171. – М.: ВНИИЦ, 2008. – 108 с.
2. Кацнельсон Б. В., Таракановский А. А. Исследование сжигания жидкого топлива в пульсирующем потоке // Высокофорсированные огневые процессы: Сб. статей. – М.-Л.: Энергия, 1967. – С. 264–282.
3. Кацнельсон Б. В., Таракановский А. А. Сжигание топлива в пульсирующем потоке // Труды № 64 ЦКТИ. – М.: ЦКТИ, 1965.
4. Технологическое пульсационное горение / В.А. Попов, В.С. Северянин, А.М. Авакумов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 320 с.

Статья поступила в редакцию 26.03.09

Борис Иванович Бахтин родился в 1939 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1962 г. Канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГУП “Центр Келдыша”. Автор более 70 научных работ в области теплообмена и теплофизики.

V.I. Bakhtin (b. 1939) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1962. Ph. D. (Eng.), leading researcher of the Federal State Unitary Enterprise “Keldysh Center”. Author of 70 publications in the field of thermal physics of two-phase media and intensification of heat exchange processes.

Михаил Дмитриевич Диев (1949–2008) окончил в 1972 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области теплофизики двухфазных сред и интенсификации процессов теплообмена.

M.D. Diev (1949-2008) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. D. Sc. (Eng.), professor of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 70 publications in the field of heat mass exchange and thermal physics.

Сергей Иосифович Каськов родился в 1964 г., окончил в 1987 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана, научный сотрудник НИИ “Энергетическое машиностроение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 11 научных работ в области исследования и конструирования теплообменных аппаратов.

S.I. Kas'kov (b. 1964) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1987. Researcher of the “Power Machine Building” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 11 publications in the field of study and construction of heat exchange apparatus.

Александр Петрович Кубышкин родился в 1959 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1983 г. Канд. физ.-мат. наук, начальник отдела ФГУП “Центр Келдыша”. Автор более 60 научных работ в области теплофизики и физической химии.

A.P. Kubyshkin (b. 1959) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1983. Ph. D. (Phys.-Math.), head of department of Federal State Unitary Enterprise “Tsentr Keldysha”. Author of more than 60 publications in the field of thermal physics and physical chemistry.

Григорий Иванович Павлов окончил Казанское высшее военное инженерное училище в 1984 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры конструкции и проектирования специальных устройств Казанского высшего военного командного училища. Автор 115 научных работ в области термоакустики и внутрикамерных процессов.

G.I. Pavlov graduated from the Kazan' Higher Military Engineering School in 1984. D. Sc. (Eng.), professor of “Construction and Design of Special Devices” department of the Kazan' Higher Military Engineering School. Author of 115 publications in the field of thermal acoustics and internal chamber processes.